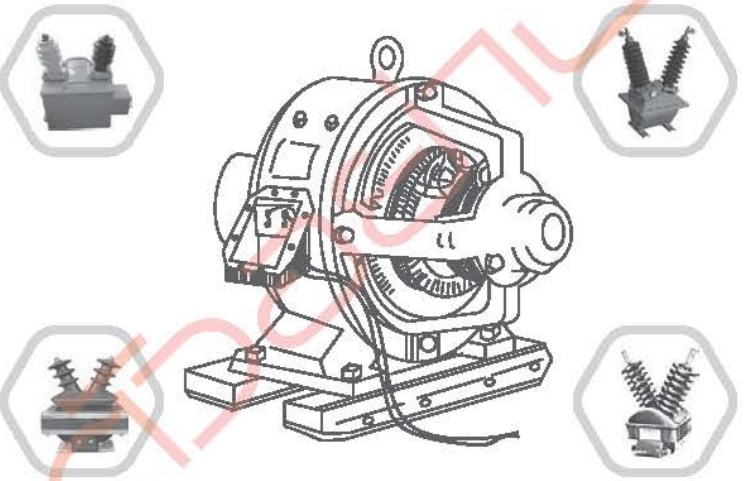
เครื่องกลไฟฟ้าเบื้องต้น

เหมาะสำหรับนักเรียน นักศึกษาระดับ ปวช. และ ปวส.
เพื่อเป็นแนวทางสู่การศึกษาระดับสูง
และผู้สนใจทั่วไป เพื่อเป็นพื้นฐานในการประกอบอาชีพ

สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

โดย ไชยชาญ หินเกิด

เครื่องกลไฟฟ้าเบื้องต้น



โดย... ไชยชาญ หินเกิด

สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

295.-

เครื่องกลไฟฟ้าเบื้องต้น

โดย...ไชยชาญ หินเกิด

ราคา 295 บาท

พิมพ์ครั้งที่ 1 พฤศจิกายน 2559

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

ไชยชาญ หินเกิด.

เครื่องกลไฟฟ้าเบื้องต้น.-- กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2559.

360 หน้า.

1. เครื่องจักรกลไฟฟ้า. I. ชื่อเรื่อง.

621.31042

ISBN 978-974-443-678-8

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ. 2558 โดย สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
ห้ามลอกเลียนไม่ว่าส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้ ไม่ว่าในรูปแบบใด ๆ
นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร

จัดพิมพ์โดย **สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.**
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
5-7 ซอยสุขุมวิท 29 ถนนสุขุมวิท แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110
โทร. 0-2258-0320 (6 เลขหมายอัตโนมัติ), 0-2259-9160 (10 เลขหมายอัตโนมัติ)
ติดต่อสำนักพิมพ์ book4u@tpa.or.th
ติดต่อสั่งซื้อหนังสือ www.tpabook.com

จัดจำหน่ายโดย **บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน)**
เลขที่ 1858/87-90 ถนนบางนา-ตราด แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260
โทร. 0-2739-8000, 0-2739-8222 โทรสาร 0-2739-8356-9
www.se-ed.com

สสท รักษ์โลก
ร่วมใช้หมึกพิมพ์จากถั่วเหลือง

50% Farmed Tree 50% EcoFiber by SCG Packaging

"ถ้าหนังสือมีข้อผิดพลาดเนื่องจากการพิมพ์ ให้นำมาแลกเปลี่ยนได้ที่สมาคมฯ" โทร. 0-2258-0320 ต่อ 1560, 1570

■ **บรรณาธิการบริหาร** สุกัญญา จารุการ **บรรณาธิการเล่ม** แสงเงิน นาคพัฒน์ **กองบรรณาธิการ** แทนพร เลิศวุฒิภัทร, พรรณพิมล กิจไพฑูรย์, วัลภา ลีรัชดานนท์, รินดา คันธวร, สุธินี เทียนกุล **ออกแบบปก** ณัฐวัตร วิวาสุขุ **ออกแบบรูปเล่ม** ธาวินี คุตตะสิงคี **ศิลปกรรม** ประเทือง คชเสนีย์ **ธุรการสำนักพิมพ์** อังคณา อรรถพงศ์ธร ■ **พิมพ์ที่** : บริษัท พิมพ์ดีการพิมพ์ จำกัด

เกี่ยวกับ สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.

สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) หรือ ส.ส.ท. ก่อตั้งอย่างเป็นทางการในวันที่ 24 มกราคม พ.ศ.2516 จากความตั้งใจมุ่งมั่น ความร่วมมือร่วมใจ และความเสียสละ ทุ่มเทกำลังกายและกำลังใจของกลุ่มบุคคลที่เคยไปศึกษาและดูงานโดยทุน ABK & AOTS ณ ประเทศญี่ปุ่น โดยมี ฯพณฯ สมหมาย ฮุนตระกูล เป็นประธานคณะกรรมการก่อตั้ง และสำเร็จด้วยความช่วยเหลืออย่างดีจาก อาจารย์ โงอิจิ โฮซูมิ อดีตประธานกรรมการ สมาคมความร่วมมือทางเศรษฐกิจญี่ปุ่น-ไทย (JTECS) ทั้งนี้โดยได้รับความช่วยเหลือทางด้านเงินทุนจากกระทรวงการค้าระหว่างประเทศและอุตสาหกรรม (METI) ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งไม่มีพันธะผูกพันใด ๆ เพื่อใช้จ่ายในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ

สำหรับ สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. จัดตั้งขึ้นเมื่อ พ.ศ. 2516 พร้อม ๆ กับการก่อตั้งสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) โดยใช้ชื่อว่า โครงการตำรา เพื่อมุ่งส่งเสริมให้มีตำราภาษาไทยเกี่ยวกับเทคโนโลยีต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับอาชีวศึกษา ซึ่งในขณะนั้นยังมีอยู่จำกัดให้แพร่หลายขึ้น เพื่อยกระดับมาตรฐานการศึกษาในสายวิชาชีพซึ่งเป็นกำลังสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมไทย

ในระยะ 4-5 ปี หลังจากการก่อตั้งสมาคมฯ โครงการตำราได้เปลี่ยนชื่อเป็น โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม และได้ขยายกิจกรรมเป็น ส่วนตำราสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม ในปี พ.ศ. 2539 พร้อม ๆ กับการขยายขอบข่ายหนังสือที่จัดพิมพ์ให้ครอบคลุมหนังสือด้านการบริหารจัดการธุรกิจ อุตสาหกรรม และจิตวิทยา-การพัฒนาตนเอง รวมถึงคณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ ทั้งที่เป็นงานเขียนและงานแปล ภายใต้ชื่อ สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อถ่ายทอดและเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่างๆ ให้แก่บุคลากรทั้งภาครัฐและเอกชน ตลอดจนนักเรียน นักศึกษา เยาวชน ซึ่งจะเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรม เศรษฐกิจ และสังคมไทยให้เติบโตได้อย่างยั่งยืนต่อไป

สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. ใคร่ขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่งต่อผู้เขียนและผู้แปลทุกท่านที่มีส่วนสำคัญในความสำเร็จของสำนักพิมพ์ตั้งแต่เริ่มต้นจวบจนปัจจุบัน และหวังว่าหนังสือของสำนักพิมพ์ ส.ส.ท. จะมีส่วนช่วยในการพัฒนาบุคลากร อันจะนำไปสู่การสร้างสรรค์สังคมและเศรษฐกิจของประเทศให้ก้าวหน้าและยั่งยืน และหากท่านผู้อ่านมีข้อชี้แนะประการใด ขอได้โปรดแจ้งให้ทางสำนักพิมพ์ทราบด้วย จักเป็นพระคุณยิ่ง

สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

คำนำ

หนังสือเครื่องกลไฟฟ้าเบื้องต้นนี้ ผู้เรียบเรียงได้ตระหนักถึงความสำคัญของการเรียนการสอนในสาขาช่างไฟฟ้า ว่าผู้เรียนควรจะมีความรู้พื้นฐานอะไรบ้าง เพื่อจะได้เป็นแนวทางที่นำไปสู่การศึกษาระดับสูงขึ้นไปอีก และเพื่อเป็นพื้นฐานในการประกอบอาชีพต่อไป

หนังสือเครื่องกลไฟฟ้าเบื้องต้นประกอบด้วยเรื่องแม่เหล็กและการเหนี่ยวนำ เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การบำรุงรักษาเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว วงจรสมมูลและโวลต์เตจเรกูเลชัน การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าและประสิทธิภาพ เครื่องหมายแสดงขั้วและการขนานหม้อแปลงไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับใช้งานพิเศษ หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส การระบายความร้อนและการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า

หนังสือเล่มนี้นอกจากจะเหมาะกับนักเรียนนักศึกษาทั้งในระดับ ปวช. และ ปวส. แล้ว ยังเหมาะกับบุคคลทั่วไปที่สนใจจะศึกษาอีกด้วย

ผู้เรียบเรียงขอขอบพระคุณเจ้าของเอกสารและตำราที่ผู้เรียบเรียงได้นำมาอ้างอิงทั้งที่ได้กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ ข้อดีทั้งหมดของหนังสือนี้ ผู้เรียบเรียงขออุทิศส่วนกุศลให้กับบิดา-มารดา และครู-อาจารย์ที่ล่วงลับไปแล้ว และถ้าหากหนังสือเล่มนี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้เรียบเรียงขอน้อมรับด้วยความเคารพ และพร้อมที่จะนำไปปรับปรุงแก้ไขในครั้งต่อไปให้ดียิ่งขึ้น

(นายไชยชาญ หินเกิด)
ผู้เรียบเรียง

สารบัญ

บทที่ 1 แม่เหล็กและการเหนี่ยวนำ 9

1.1 แม่เหล็กไฟฟ้า 10
1.2 วงจรแม่เหล็ก 13
1.3 กระแสไหลวน 17
1.4 สนามแม่เหล็ก 18
1.5 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล 22
1.6 การเหนี่ยวนำ 29
1.7 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับการเหนี่ยวนำ 32
1.8 กฎมือขวาของเฟลมมิ่ง 34
1.9 กฎของเลนซ์ 34
1.10 กฎของแมกซ์เวลล์ 35
1.11 การเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้า 36
แบบฝึกหัดบทที่ 1 43

บทที่ 2 เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง 44

2.1 โครงสร้างของเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง 44
2.2 การพันขดลวดอาร์เมเจอร์ 49
แบบฝึกหัดบทที่ 2 60

บทที่ 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 62

3.1 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 67
3.2 ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 68
3.3 การเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 74
3.4 สาเหตุที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไม่เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 76
3.5 สาเหตุของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นไม่ถึงค่าสูงสุด และสาเหตุที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาก 79
3.6 อาร์เมเจอร์รีแอกชัน 79
3.7 การแก้อาร์เมเจอร์รีแอกชัน 81

3.8 การคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 84
3.9 แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำหรือสมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 94
3.10 ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 97
3.11 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 104
3.12 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า 112
3.13 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 113
3.14 การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 118
แบบฝึกหัดบทที่ 3 120

บทที่ 4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 125
4.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 125
4.2 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 133
4.3 อาร์เมเจอร์รีแอกชันในมอเตอร์ 136
4.4 คุณลักษณะและการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 138
4.5 วิธีกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 153
4.6 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 159
4.7 การเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 161
แบบฝึกหัดบทที่ 4 168

บทที่ 5 การบำรุงรักษาเครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง 173
5.1 วิธีบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 173
5.2 วิธีบำรุงรักษาแปรงถ่าน 175
5.3 วิธีตรวจการเสื่อมสภาพของฉนวนไฟฟ้า 177
5.4 วิธีตรวจหาวงจรเปิดและวงจรลัดขดลวดฟิลด์คอยล์ 178
5.5 การหล่อลื่น 179
แบบฝึกหัดบทที่ 5 182

บทที่ 6 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียว 183
6.1 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า 183

6.2 การทำงานเบื้องต้นของหม้อแปลงไฟฟ้า 186
6.3 หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ 187
6.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในหม้อแปลง 188
6.5 สมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้า 190
6.6 หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานจริง 192
แบบฝึกหัดบทที่ 6 206

บทที่ 7 วงจรสมมูลและโวลต์เตจเรกูเลชัน 209
7.1 ความต้านทานสมมูล 209
7.2 เส้นแรงแม่เหล็กรั่วไหล 210
7.3 อิมพีแดนซ์สมมูล 212
7.4 โวลต์เตจเรกูเลชัน 217
แบบฝึกหัดบทที่ 7 229

บทที่ 8 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าและประสิทธิภาพ 231
8.1 การทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 231
8.2 การสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า 238
8.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง 239
8.4 ประสิทธิภาพตลอดทั้งวัน 244
แบบฝึกหัดบทที่ 8 248

บทที่ 9 เครื่องหมายแสดงขั้วและการขนานหม้อแปลงไฟฟ้า 251
9.1 เครื่องหมายแสดงขั้ว 251
9.2 การขนานหม้อแปลง 255
9.3 หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 259
แบบฝึกหัดบทที่ 9 263

บทที่ 10 หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับใช้งานพิเศษ 266
10.1 หม้อแปลงเครื่องมือวัด 266
10.2 หม้อแปลงแบบออโต 274

10.3 หม้อแปลงกระแสคงตัว 277
10.4 หม้อแปลงเครื่องเชื่อมไฟฟ้า 279
แบบฝึกหัดบทที่ 10 282

บทที่ 11 หม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส 283
11.1 การต่อแบบเดลตา-เดลตา 284
11.2 การต่อแบบวาย-วาย 289
11.3 การต่อแบบเดลตา-วาย 294
11.4 การต่อแบบวาย-เดลตา 298
11.5 การต่อแบบโอเพนเดลตา 300
แบบฝึกหัดบทที่ 11 320

บทที่ 12 การระบายความร้อนและการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า 324
12.1 การระบายความร้อนหม้อแปลง 324
12.2 น้ำมันหม้อแปลง 326
12.3 การตรวจสอบหม้อแปลงก่อนนำไปติดตั้ง 332
12.4 ข้อปฏิบัติก่อนนำหม้อแปลงไปติดตั้ง 333
12.5 การติดตั้งและการบำรุงรักษา 335
12.6 การตรวจสอบหม้อแปลง 338
12.7 การสร้างหม้อแปลงขนาดเล็ก 344
แบบฝึกหัดบทที่ 12 352

บรรณานุกรม 354

1 แม่เหล็กและการเหนี่ยวนำ

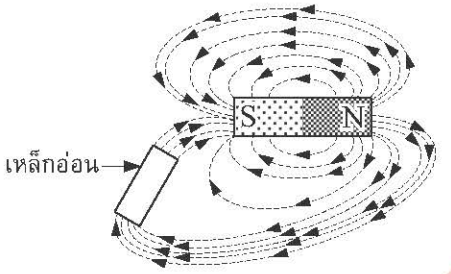
อำนาจแม่เหล็กไม่สามารถมองเห็นด้วยตา เปรียบเหมือนกระแสลมแม้มีอานุภาพมากก็ไม่สามารถมองเห็นด้วยตา อำนาจแม่เหล็กก็เช่นเดียวกัน เรามองไม่เห็น แต่รับรู้ได้ด้วยความรู้สึก อำนาจแม่เหล็กจะวิ่งออกจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง

คุณสมบัติหนึ่งของเส้นแรงแม่เหล็กคือ เส้นแรงแม่เหล็กแต่ละเส้นจะผลักกัน ไม่มีเส้นแรงที่ตัดกันหรือรวมกันเป็นเส้นเดียวและไม่มีฉนวนใดในโลกที่กั้นเส้นแรงแม่เหล็กได้ เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่านวัตถุได้ทุกชนิด แต่ผ่านได้ยากง่ายแตกต่างกัน เส้นแรงแม่เหล็กผ่านวัตถุบางชนิดได้ยาก แต่บางชนิดก็ผ่านได้ง่าย วัตถุที่เส้นแรงแม่เหล็กผ่านได้ยากแสดงว่าวัตถุนั้นเฉื่อย เส้นแรงแม่เหล็กจะเดินในทางที่มีความต้านทานแม่เหล็กต่ำ และเนื่องจากอากาศมีความต้านทานแม่เหล็กสูงกว่าเหล็ก ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเดินผ่านเหล็กได้ง่ายกว่าอากาศ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กในเหล็กมีมากกว่าในอากาศ

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่มีอยู่ในพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร เรียกว่า ความเข้มสนามแม่เหล็ก เส้นทางที่เส้นแรงแม่เหล็กใช้เป็นทางเดินหรือเป็นจุดที่เส้นแรงแม่เหล็กเข้าหรือออกก็คือขั้วแม่เหล็ก ทางเดินนี้ เรียกว่า วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit) จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งผ่านก้อนวัตถุใด ๆ จะมีค่าสูงสุดเพียงค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุนั้น เมื่อมีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนเท่าค่าสูงสุดนี้วิ่งผ่านวัตถุใด เรียกว่า วัตถุนั้นถึงจุดอิ่มตัวต่อเส้นแรงแม่เหล็ก (Saturation)

ในสารที่ยังไม่เป็นแม่เหล็ก อาจสร้างอำนาจแม่เหล็กได้โดยวิธีการเหนี่ยวนำ คือถ้าเราวางแท่งเหล็กอ่อนแท่งหนึ่งลงในสนามแม่เหล็กถาวร เป็นเวลาไม่นานนัก เหล็กอ่อนนั้นจะมีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้นเพราะถูกเหนี่ยวนำ สาเหตุเพราะเส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งอยู่ในอากาศจะพยายามวิ่งเข้าหาแท่งเหล็กอ่อนดังแสดงในรูปที่ 1.1 เหล็กอ่อนนั้นมีความต้านทานแม่เหล็กน้อยกว่าอากาศ ขณะที่เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งผ่านเหล็กอ่อน โมเลกุลของเหล็กอ่อนจะเรียงตัวกันใหม่ให้ขนานกับแนวเส้นแรง พร้อมกับชี้ขั้วเหนือของโมเลกุลไปทางทิศเดียวกับเส้นแรงนั้นด้วย ขณะนี้เองแท่งเหล็กอ่อนซึ่งถูกเหนี่ยวนำจะมีอำนาจแม่เหล็กและเกิดขั้วเหนือขั้วใต้ดังแสดงในรูปที่ 1.1

ต่อมาถ้ายกแท่งแม่เหล็กถาวรออก แท่งเหล็กอ่อนจะสูญเสียอำนาจแม่เหล็กไปมาก แต่ไม่ถึงกับเป็นศูนย์ เพราะจะมีอำนาจแม่เหล็กตกค้างอยู่บ้าง อำนาจแม่เหล็กนี้ เรียกว่า อำนาจแม่เหล็กตกค้าง (Residual flux or Residual magnetism)



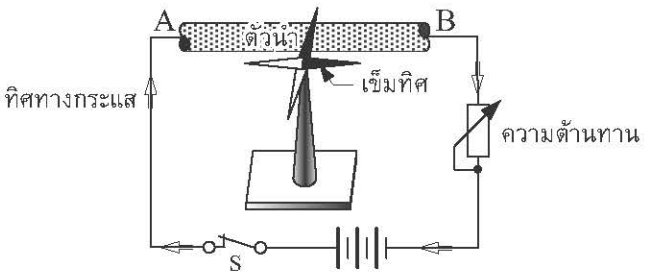
รูปที่ 1.1 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กในเหล็กอ่อน

1.1 แม่เหล็กไฟฟ้า

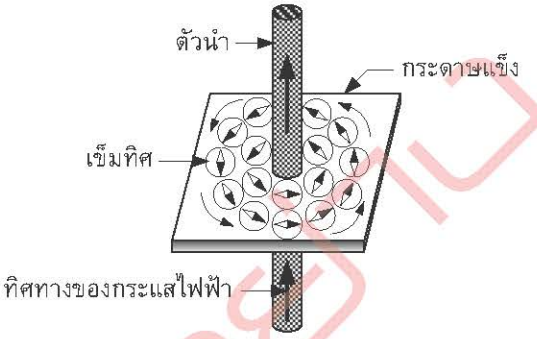
ในปี ค.ศ. 1819 แฮนส์ คริสเตียน เออร์สเตด (Hans Christian Oersted) นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์กทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า และพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเสมอ

เออร์สเตดทดลองโดยต่อลวดตัวนำไฟฟ้า AB กับเซลล์ไฟฟ้า และให้ตัวนำนั้นวางขนานกับเข็มทิศที่วางอยู่ใต้ตัวนำนั้น แสดงดังรูปที่ 1.2 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำจะทำให้เข็มทิศเบี่ยงเบนจากแนวขนานเดิม โดยเข็มทิศจะตั้งฉากกับตัวนำ AB แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลกลับทาง เข็มทิศจะเบี่ยงเบนกลับไปอีกทิศทางหนึ่ง ซึ่งทำมุมกับตำแหน่งเดิม 180 องศา และยังพบอีกว่าถ้าให้ลวดตัวนำทำมุม 90 องศากับเข็มทิศแล้ว เข็มทิศจะไม่เบี่ยงเบนเลย

เออร์สเตดยังค้นพบอีกว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้านั้นประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนหนึ่งจัดเรียงเป็นวงรอบ ๆ ตัวนำที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านนั้น โดยตัวนำจะเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมเหล่านั้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดรอบ ๆ ตัวนำนี้ ถ้ายิ่งอยู่ห่างจากตัวนำมาก อำนาจแม่เหล็กก็ยิ่งน้อย การเกิดสนามแม่เหล็กนี้แสดงดังรูปที่ 1.3 โดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ในแนวตั้งทะลุผ่านกระดาษแข็ง แล้วนำเข็มทิศวางไว้บนกระดาษแข็งตามตำแหน่งต่าง ๆ จะสังเกตเห็นว่าทิศทางของเข็มทิศจะหันเหเรียงตามกันไปเป็นวงกลมรอบตัวนำ โดยให้สีดำแทนขั้วเหนือและสีขาวแทนขั้วใต้ หรืออาจใช้ผงเหล็กโรยจะสังเกตเห็นว่าผงเหล็กจะจัดเรียงตัวกันเป็นวงกลม

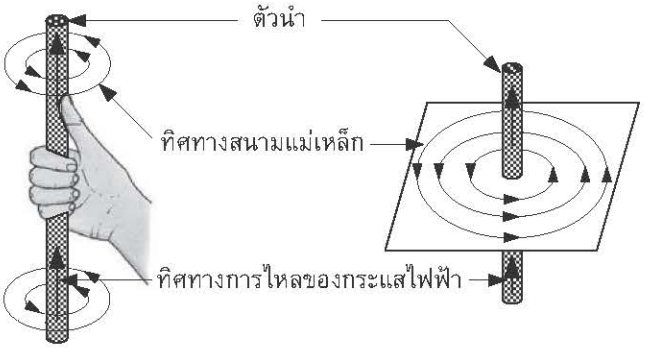


รูปที่ 1.2 การทดลองของเออร์สเตด



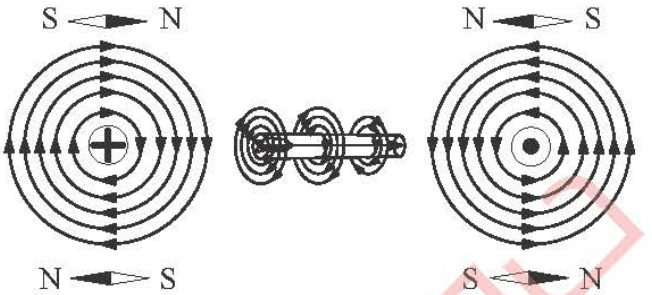
รูปที่ 1.3 การเกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดรอบ ๆ ตัวนำไฟฟ้ากับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำ สามารถหาได้โดยการใช้กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก (Right hand rule for magnetic field) คือให้ใช้มือขวากำรอบตัวนำไฟฟ้า โดยให้หัวแม่มือชี้ไปตามความยาวของตัวนำแทนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า และให้นิ้วทั้งสี่ที่เหลือกำรอบตัวนำ โดยนิ้วทั้งสี่นั้นจะแทนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดรอบ ๆ ตัวนำนั้นดังแสดงในรูปที่ 1.4

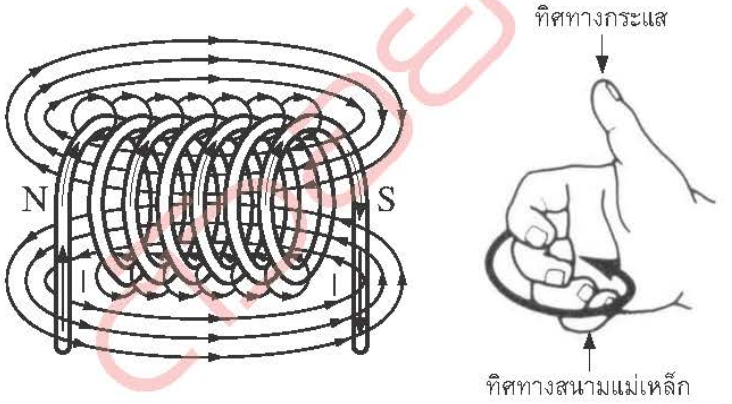


รูปที่ 1.4 กฎมือขวาของเส้นแรงแม่เหล็ก

การแสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าไปตามความยาวของตัวนำไฟฟ้านั้นจะใช้ลูกศร โดยจะกำหนดให้ด้านที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปเป็นกันลูกศรซึ่งจะแทนด้วยเครื่องหมายกากบาท (+) ส่วนด้านที่กระแสไฟฟ้าไหลออกซึ่งเห็นเป็นหัวลูกศรจะแทนด้วยเครื่องหมายจุด (•) เส้นแรงแม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็กที่เกิดรอบตัวนำแสดงได้ดังรูปที่ 1.5 ส่วนรูปที่ 1.6 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดในขดลวด



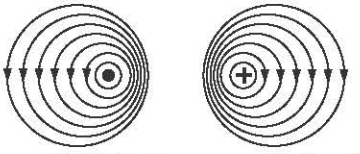
รูปที่ 1.5 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและทิศทางของสนามแม่เหล็กรอบตัวนำ



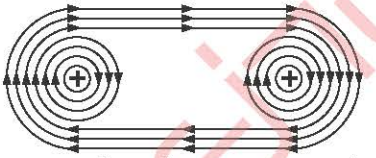
รูปที่ 1.6 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวด

เมื่อนำตัวนำสองตัวมาวางขนานกัน และมีกระแสไฟฟ้าในตัวนำทั้งสองไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.7 (ก) สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำทั้งสองจะสามารถหาได้จากกฎมือขวา โดยกระแสไฟฟ้าไหลออกแสดงด้วยจุด คือตัวนำด้านซ้ายมือ และตัวนำด้านขวามือให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าแสดงด้วยเครื่องหมายกากบาท สนามแม่เหล็กที่เกิดรอบตัวนำทางด้านซ้ายมือจะมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ส่วนสนามแม่เหล็กที่เกิดรอบตัวนำทางด้านขวามือที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นจะเห็นว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดรอบตัวนำทั้งสองนั้นมีทิศทางไปในทางเดียวกัน ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหมือนกัน จึงเกิดแรงผลักกันระหว่างตัวนำทั้งสองที่วางขนานกัน

ถ้าตัวนำทั้งสองที่วางขนานกันนั้นมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกัน โดยสมมติให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าดังแสดงในรูปที่ 1.7 (ข) สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวนำทางด้านซ้ายมือจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา และสนามแม่เหล็กที่เกิดรอบ ๆ ตัวนำทางด้านขวามือก็จะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยเช่นกัน ทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กที่ต่างกันจึงเกิดแรงดึงดูดกัน ตัวนำทั้งสองจะถูกดึงเข้ามาใกล้กัน



(ก) ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกันในตัวนำที่วางขนานกัน



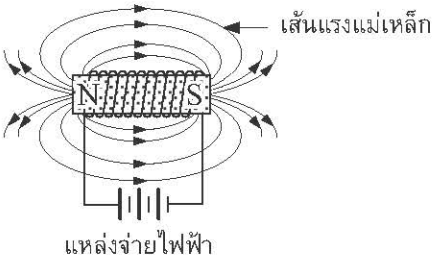
(ข) ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันในตัวนำที่วางขนานกัน

รูปที่ 1.7 การเกิดสนามแม่เหล็กที่ตัวนำสองตัววางขนานกัน

1.2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic circuit)

วงจรแม่เหล็ก หมายถึง ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรแม่เหล็กก็เหมือนวงจรไฟฟ้า แต่มิได้หมายความว่าจะเหมือนกันทั้งหมด เพราะหน่วยต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้านั้นจะต่างกัน แต่ความหมายต่าง ๆ มักจะคล้ายกัน เช่น แรงดันแม่เหล็ก หมายถึง แหล่งที่ทำให้เกิดการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็ก ส่วนในวงจรไฟฟ้านั้นมีแรงดันไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร

ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดที่ขดลวดที่พันไว้บนแกนเหล็กแสดงดังรูปที่ 1.8 โดยขดลวดนั้นมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้ ส่วนทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กนั้นสามารถหาได้จากการใช้กฎมือขวา



รูปที่ 1.8 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหล

1.2.1 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Maximum flux density)

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก คือ ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ 1 หน่วยพื้นที่ ซึ่งจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อพื้นที่นี้เรียกว่า ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยวัดเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร (Weber per square metre, $\frac{Wb}{m^2}$) หรือเทสลา (Tesla) ใช้สัญลักษณ์ B ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการ คือ

$$B = \frac{\Phi}{A} \qquad \frac{Wb}{m^2}$$

เมื่อ B = ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก เป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร ($\frac{Wb}{m^2}$)

Φ = เส้นแรงแม่เหล็ก เป็นเวเบอร์ (Wb)

A = พื้นที่หน้าตัดของวงจรแม่เหล็กเป็นตารางเมตร (m^2)

(1 เทสลา มีค่าเท่ากับ 1 $\frac{Wb}{m^2}$)

หรือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กอาจหาได้จากสมการดังต่อไปนี้คือ

$$B = \mu H \qquad \frac{Wb}{m^2}$$

เมื่อ μ = ความซาบซึมได้ของวัสดุ (ที่เป็นสารแม่เหล็ก) มีหน่วยเป็นเฮนรีต่อเมตร หรือเวเบอร์ต่อแอมแปร์เมตร ($\frac{H}{m}$ or $\frac{Wb}{A\text{-}m}$)

H = ความเข้มของสนามแม่เหล็ก เป็นแอมแปร์ต่อเมตรหรือแอมแปร์รอบต่อเมตร ($\frac{A}{m}$ or $\frac{A\text{-}T}{m}$)

1.2.2 ความซาบซึมได้ (Permeability)

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจริงจะขึ้นอยู่กับโมเลกุลของแกนเหล็กว่าจะสามารถวางตัวในแนวเดียวกันได้ง่ายเพียงใด เรียกว่า ความซาบซึมได้ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ μ (เป็นอักษรกรีก อ่านว่า มิว) ความซาบซึมได้นี้เป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นแห่งการเหนี่ยวนำต่อแรงดันแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้ว่า